

出國報告（出國類別：考察）

高效率冷噴鐳及噴鐳技術與成形 技術在葉片再生及新製之應用

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李日輝 資深機械研究專員

派赴國家：德國、瑞士

出國日期：103年11月23日至12月06日

報告日期：104年01月30日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高效率冷噴鋅及噴鋅技術與成形技術在葉片再生及新製之應用

頁數 37 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李日輝/台灣電力公司/綜合研究所/資深機械研究專員/(02) 8078-2217

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：103 年 11 月 23 日至 12 月 06 日 出國地區：德國、瑞士

報告日期：104 年 01 月 30 日

分類號/目

關鍵詞：冷噴鋅，真空噴鋅，3D 成形，葉片內孔鍍層

內容摘要：(二百至三百字)

近年來國外葉片製造公司或機組原製造廠為提升葉片之抗高溫氧化能力，迅速研發高壓冷噴鋅塗層技術，並應用於氣渦輪機葉片之金屬塗層再生或鋅修。本所正進行先進渦輪機動靜葉片應用冷噴鋅塗層技術進行葉片之抗高溫氧化塗層噴鋅及鋅修技術研發工作。故希望藉本研究了解國外相關技術與，並學習相關技術經驗，以提昇本所葉片再生之高壓冷噴鋅技術與品質。

為建立符合品質、時效及成本效益之自有維修技術，希望藉由至德國 Impact Innovations GmbH公司與Solutionix公司及瑞士Sulzer Metco公司與IONBOND公司，研習冷噴鋅與真空噴鋅技術、3D成形技術及葉片內孔鍍層技術，將來應用於本公司三菱機組501F、501及西門子G3D葉片抗高溫氧化塗層再生噴鋅及鋅補與成形。以提昇本公司在葉片噴鋅、鋅修及工件成形與修改設計之技術，藉此降低電力組件新品購置成本，並增進本公司各種渦輪機組件再生及製造能力。

本研習期望了解國外之技術現況並在士當時機順利引進適合公司之葉片冷噴鋅、真空噴鋅與內孔鍍層技術及3D成形技術，提昇本公司葉片抗高溫氧化塗層技術之品質及葉片之精密性，並建立氣渦輪機葉片再生與新製之塗層技術。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

出國報告審核表	I
出國報告書提要	II
目 錄	III
表 目 錄	IV
圖 目 錄	IV
一、出國緣由、行程及主要任務.....	1
1、1 出國緣由.....	1
1、2 出國行程及主要任務.....	2
二、先進冷噴鋅研習內容.....	3
2、1 冷噴鋅原理.....	3
2、2 冷噴鋅實務.....	7
2、2、1 噴塗顆粒速度對塗層的性質影響.....	7
2、2、2 冷噴鋅金相組織及強度.....	8
2、2、3 冷噴鋅之應用.....	9
三、掃描建模技術研習.....	16
3、1 掃描建模技術介紹.....	16
3、2 移動式掃描建模技術及實務.....	17
四、葉片內孔鍍層技術研習.....	20
4、1 葉片內部缺陷介紹.....	20
4、2 化學氣相沉積鍍鋁原理.....	22
4、3 化學氣相沉積鍍鋁實務.....	22

五、其他相關技術研習·····	31
六、心得及建議·····	34
七、參考文獻·····	35

表 目 錄

表 1 不同噴塗方法之參數比較·····	4
表 2 冷噴鋅噴塗層結合強度拉伸試驗數據·····	13

圖 目 錄

圖 1 不同噴塗方法之空孔情形金相照片·····	5
圖 2 冷噴鋅原理及裝置照片·····	6
圖 3 冷噴鋅噴塗氣體/顆粒速度對鍵結情形之影響·····	11
圖 4 冷噴鋅噴塗後之橫切面金相照片·····	12
圖 5 冷噴鋅噴塗層結合強度拉伸試驗裝置照片·····	13
圖 6 冷噴鋅噴塗應用實例照片·····	14
圖 7 綜合研究所現有量測及建模設備量測情形·····	18
圖 8 移動式光柵式掃描量測情形·····	19

圖 9 西門子公司動葉片冷卻流道·····	24
圖 10 西門子 V84.2 第一級動葉片內部冷卻流道損傷 RT 照片·····	25
圖 11 化學氣相沉積設備照片及簡易流程圖·····	26
圖 12 化學氣相沉積噴塗葉片照片·····	27
圖 13 化學氣相沉積噴塗後金相照片·····	28
圖 14 化學氣相沉積鍍鋁及熱處理前後金相照片·····	29
圖 15 Rene 80 材料不同鍍鋁法在 1100°C 之循環氧化試驗結果···	30
圖 16 電漿噴塗輔助物理蒸鍍法原理及成品照片·····	32
圖 17 Oerlikon Metco 公司雷射覆鍍實例·····	33

一、出國緣由、行程及主要任務

1、1 出國緣由

公司有超過50部之氣渦輪機組，其熱段組件在高達1200°C的溫度下運轉，使組件受高溫氧化及高溫腐蝕而有劣化現象。近年來國外葉片製造公司或機組原製造廠，如德國西門子公司及日本Plasma Gen公司等，為提升葉片之抗高溫氧化能力，迅速研發高壓冷噴鋁塗層技術，並應用於氣渦輪機葉片之金屬塗層再生或鋁修應用。

本所為因應電廠葉片再生品質、時效及成本效益等面向之考量，正致力於建立品質適切、效率更高及成本更低之維修技術。先進渦輪機動靜葉片應用冷噴鋁塗層技術，以進行葉片之抗高溫氧化塗層噴鋁及鋁修技術研發工作正是其中的一項重要的技術。因此希望經由本研究了解國外冷噴鋁技術進行葉片塗層噴鋁及鋁修技術之發展，並學習相關技術，藉以提昇本所葉片再生之高壓冷噴鋁技術與品質。

本研習參訪參訪德國 Impact Innovations GmbH公司與Solutionix公司及瑞士Sulzer Metco公司與IONBOND公司，研習冷噴鋁與真空噴鋁技術、3D成形技術及葉片內孔化學氣相沉積鍍層技術，以提昇本公司在葉片噴鋁、鋁修及工件成形與修改設計之技術。

1、2 出國行程及主要任務

本次出國實習期間為103.11.23~103.12.6，共計14天。11月23日搭乘華航班機，於24日抵達德國法蘭克福市區，24日至26日參訪Solutionix公司，研習先進之掃描建模技術，並了解其量測大形工件的可行性；11月27日及28日於慕尼黑近郊之拉滕基興參訪Impact Innovations GmbH公司，研習先進冷噴鐳技術，並了解其在3D成形之技術及經驗；11月29日至12月2日於蘇黎世參訪IHI IONBOND AG公司，研習葉片內孔化學氣相沉積鍍層技術並了解其安全性及附產物處理方式；12月3日及4日於蘇黎世近郊之沃倫參訪Oerlikon Metco公司，研習先進冷噴鐳技術及真空噴鐳技術。12月5日及6日為返程，自德國法蘭克福機場搭乘華航班機返抵台北，詳細行程如下：

11/23~24	往程(台北→法蘭克福)
11/24~26	SOLUTIONIX 公司(法蘭克福) 研習先進之掃描建模技術
11/27~28	Impact Innovations GmbH 公司(拉滕基興) 研習先進冷噴鐳及成形技術
11/29~12/02	IHI IONBOND AG 公司(蘇黎世) 研習葉片內孔鍍層技術
12/03~04	Oerlikon Metco 公司(沃倫) 研習先進冷噴鐳技術及真空噴鐳技術
12/05~06	返程(法蘭克福→台北)

二、先進冷噴鋅研習內容

學習先進國家的冷噴鋅技術經驗，為本次出國研習的主要目的，以期能建立噴塗效率更高以及與底材結合力更強的噴塗層，並且藉助其堆疊非常大厚度的可能性，將來開發一些組件的近似成形製程並配合適當的後加工。本次研習所參訪的Impact Innovations GmbH公司以及Oerlikon Metco公司，均具有設計及製造冷噴鋅備的能力，並且具有豐富的噴塗技術與經驗，兩者的設備頗為相近，以下將參訪此兩家公司得到的心得合併介紹。

2、1 冷噴鋅原理

以往的火焰噴塗、電弧式噴塗、電漿噴塗及高速火焰噴塗等方法，藉助最高可達3160~20000°C的高溫，將噴鋅材料在熔融的狀態，以低於550 m/sec的速度噴塗在工件上，這些方法中，除了真空電漿噴塗以外，都有較大的空孔率及明顯的氧化現象；冷噴鋅則是在低於500°C、最高可達2500 m/sec的氣體帶動下，將噴鋅材料在未熔融的狀態，藉助高壓高速惰態氣體，將噴塗材料快速推送堆疊至基材表面，形成緻密塗層以得到較強的結合，由於材料並未熔融，因此採用冷噴鋅方法進行噴塗不易產生氧化物，而底材受熱少所以也不易變形或變質^(1~2)。

表1為不同噴塗方法之參數比較，如前所述以往的方法在噴塗材料熔融狀態進行噴塗，加上其在大氣或低度真空下施作，因此空孔率高、氧化現象明顯、鍵結強度較低，雖然這些方法的塗覆速度並不亞於冷噴鋅，但由於鍵結強度較低，因此有效堆疊的厚度則遠不及冷噴鋅⁽²⁾。

圖1為不同噴塗方法之空孔情形金相照片，顯示火焰噴塗空孔率在1%以上、高速火焰噴塗空孔率約0.5%，至於冷噴鋅空孔率則只有0.2%⁽²⁾。

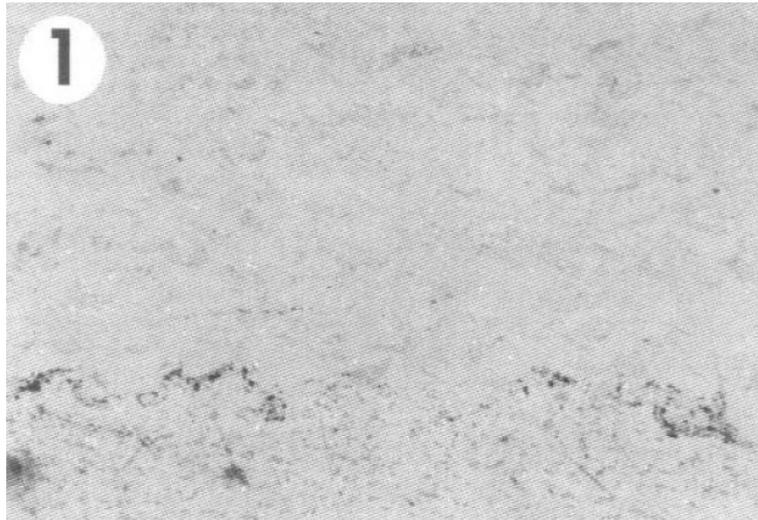
表 1 不同噴塗方法之參數比較⁽²⁾

	溫 度	噴塗顆粒速度	塗 覆 速 度
火焰噴塗	≤3160°C	50~200 m/sec	1~8 Kg/h
電弧式噴塗	≤4000°C	≤150 m/sec	8~20 Kg/h
電漿噴塗	≤20000°C	≤450 m/sec	4~8 Kg/h
高速火焰噴塗	≤3160°C	≤550 m/sec	2~8 Kg/h
冷噴鋅	≤500°C	550~2500 m/sec	6~8 Kg/h

圖2為冷噴鋅原理及裝置照片^(1~2)。如圖2(a)所示：電漿噴塗通常於1000~3000°C的高溫、低於550 m/sec的速度下進行噴塗；高速火焰噴塗則在500~1500°C的溫度、300~700 m/sec的速度內進行噴塗；至於冷噴鋅則在1000°C以內、500~1000 m/sec的速度範圍進行噴塗，甚至有資料顯示配合噴塗的材料需求，例如Ti-6Al-4V或Inconel 718，冷噴鋅設備必須並且也可以加壓至2000 m/sec以上的速度進行噴塗⁽³⁾。

圖2(b)為冷噴鋅設備示意圖^(1,2)，惰性氣體經控制箱分流一部分至送粉機以便輸送噴塗粉末；另一部分氣體則輸送至加熱器加熱後送入噴槍，然後加熱氣體與輸送之粉末高速噴向工作物表面堆疊。由於氣體加熱器與噴槍距離不宜過長，以免影響保溫效果，因此圖(b)之方式限制了噴槍動作的靈活度。市面上已有改良的新型式，如圖2(c)所示，將氣體加熱裝置統整於噴槍內^(3,4)，如此噴槍動作將有更大的靈活度，Impact Innovations GmbH公司並且進一步將輸送氣體壓力提高到50 Bar，又將加熱氣體溫度提升到800°C及1100°C兩種選擇，以因應不同粉末之噴塗^(2,3)。

(a)



(b)



(c)

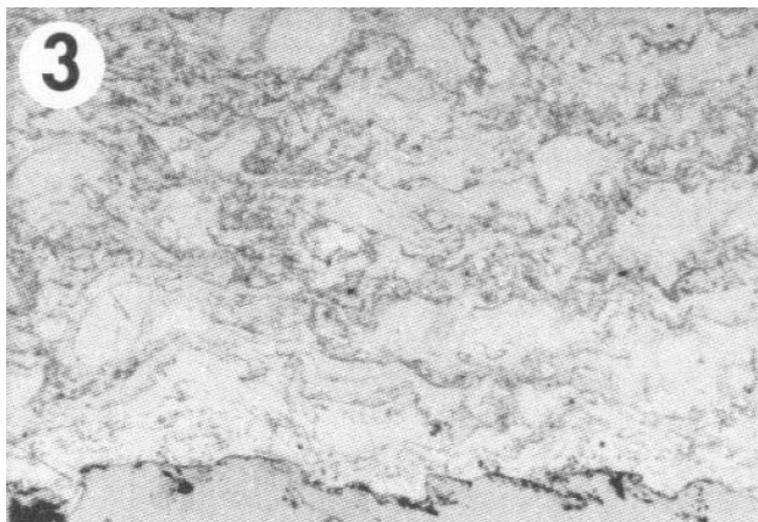


圖 1 不同噴塗方法之空孔情形金相照片⁽²⁾ (a) 冷噴鋅 (b) 傳統火焰噴塗 (c) 高速火焰噴塗

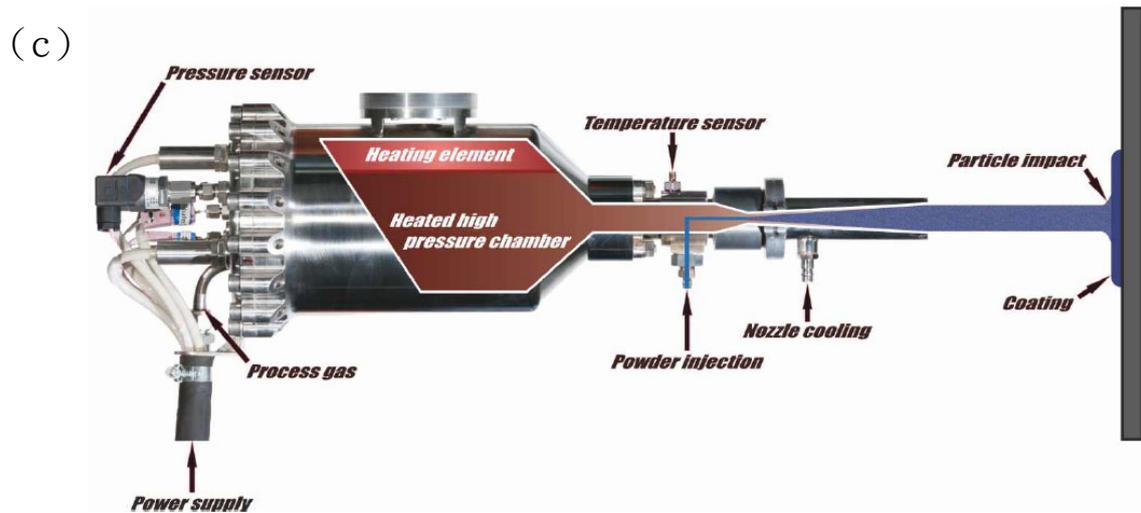
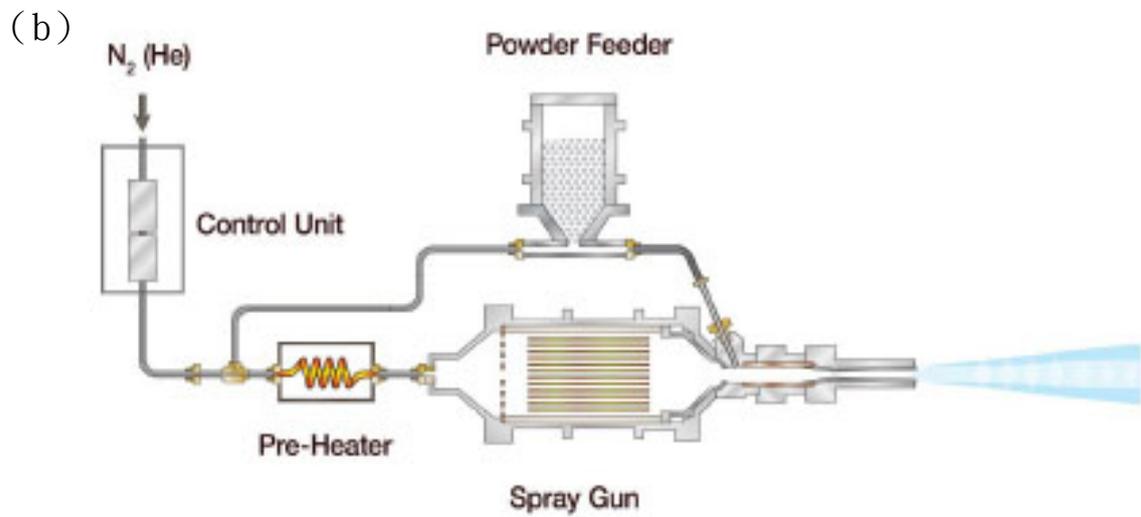
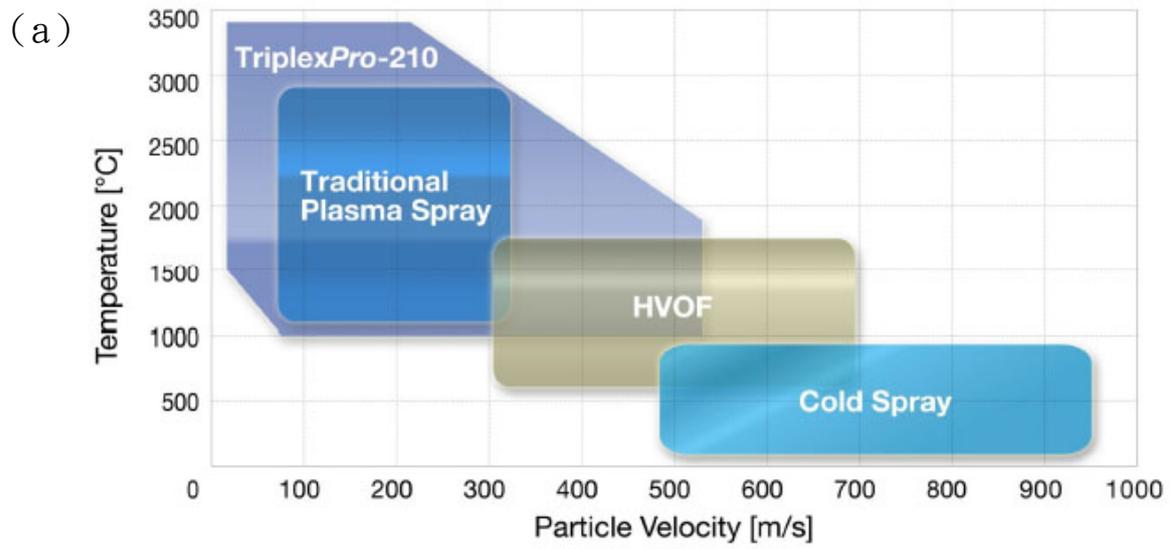


圖 2 冷噴鋁原理及裝置照片^(1,2) (a) 冷噴鋁施作溫度及速度 (b) 冷噴鋁設備示意圖 (c) 冷噴鋁噴槍剖面圖

2、2 冷噴鋅實務

2、2、1 噴塗顆粒速度對塗層的性質影響

既然冷噴鋅不是藉助高溫將粉末熔融，而是藉助非常高的噴塗顆粒速度將粉末嵌入工件表面，因此其噴塗顆粒速度至為關鍵，只有適當的噴塗顆粒速度才能得到良好品質的噴塗工件。圖3為冷噴鋅噴塗氣體/噴塗顆粒速度對鍵結情形之影響^(1,4)，圖3 (a) 為噴塗材料嵌入程度示意圖，由於冷噴鋅是藉助噴塗顆粒的速度將粉末嵌入工件表面形成適當的凹穴以利後續粉末堆疊，因此當冷噴鋅噴塗顆粒速度過低的時候，粉末在工件表面如同附著的水滴一般，仍保有表面張力及自身完整的形狀，如同圖3 (a) 中第1個示意圖，此時噴塗材料與底材的結合力很低；而當噴塗顆粒速度非常高的時候，粉末如同砲彈一般，在工件表面製造頗深的坑洞，至於粉體本身則向外飛濺，形成嵌入的部分厚度不足，並且造成不少裂紋等材料結合不良的現象，如圖3 (a) 中第3個示意圖；當噴塗顆粒速度適當的時候，粉體嵌入的厚度適當並且橫向往外推展，如圖3 (a) 中第2個示意圖，此一情形有利於後續粉末堆疊時得到適當的結合力，如圖3 (a) 中第4個示意圖。

圖3 (b) 顯示了將銅合金噴塗在碳鋼時，不同的氣體/噴塗顆粒速度所可能得到的截然不同的結果，例如氣體/噴塗顆粒速度350m/s時，銅粉末只是附著在工件上，嵌入的比例很低；當噴塗顆粒速度提升至750 m/s時，噴塗粉末嵌入到一定的深度，而粉體完好、厚度足夠並且將底材往橫向推擠；當噴塗顆粒速度提升至1150 m/s時，噴塗粉末嵌入底材更深，但是粉體表面已呈現爆破的現象；如果將噴塗顆粒速度

提升至1450 m/s，則噴塗粉末嵌入底材非常深，但粉體表面如同炸開一般，同時造成不少裂紋等現象使後續材料結合不良。因此以銅合金粉末進行冷噴鋅，視底材而定，其較適合的氣體/噴塗顆粒速度介於750 m/s~1150 m/s之間^(1,4)。

圖3(c)為各種噴塗材料之最適化氣體/噴塗顆粒速度範圍，例如噴塗鋁及鎳時較佳的氣體/噴塗顆粒速度在700 m/s~1500 m/s之間，而其最佳噴塗顆粒速度在800 m/s~1250 m/s之間；噴塗Inconel 625時較佳的氣體/噴塗顆粒速度在750 m/s~1750 m/s之間，而其最佳噴塗顆粒速度在1100 m/s~1400 m/s之間；噴塗鈦時較佳的氣體/噴塗顆粒速度約在750 m/s~1900 m/s之間，而其最佳噴塗顆粒速度在1150 m/s~1600 m/s之間；至於噴塗Inconel 718及Ti-6Al-4V則有時需2000 m/s以上的氣體/噴塗顆粒速度^(1,4)，此部分亦取決於所被噴塗工件的材質。

2、2、2 冷噴鋅金相組織及強度

冷噴鋅由於輸送氣體及粉末的溫度低於材料熔點，故噴塗過程氧化物生成率低，只有0.2%以下，因此塗層緻密性高⁽²⁾。圖4為噴鋅噴塗銅合金及鈦合金試片之橫切面金相照片^(1,4)，圖4(a)為傳統方法噴塗銅合金的橫切面照片，顯示其夾雜許多氧化物，圖4(b)為冷噴鋅噴塗銅合金的橫切面照片，顯示只有及細微的氧化物的痕跡，圖4(c)的噴塗鈦合金的橫切面照片同樣呈現少數細微的氧化物的痕跡，將其以腐蝕液浸蝕後，可以發現噴塗過程留下非常窄小的接合界面^(1,4)。

Oerlikon Metco公司以及Impact Innovations GmbH公司皆採用TCT(Tubular Coating Tensile)Test法測試冷噴鋅塗層的結合強度，

圖5為冷噴鋁噴塗層結合強度拉伸試驗裝置照片^(1,5)。圖中以底材及塗層材料結合的試片，其左右各鎖入一段拉桿，圖中試片左半為底材，右半為噴塗層，將試片置於拉伸試驗機進行測試，即可得到其斷裂時的強度值。表2列舉了噴塗鈦合金、316L不鏽鋼、Inconel 625及鋁合金的TCT測試結果，其強度分別為300 Mpa、230 Mpa、150 Mpa、130 Mpa，由於TCT測試法在螺牙部份有應力集中的效應，因此經由換算得到其抗拉強度分別為：465 Mpa、350 Mpa、230 Mpa、200 Mpa，經比對分別為原始鈦合金、316L不鏽鋼、Inconel 625及鋁合金材料強度的68.4%、58.3%、24.2%及40%^(1,4)。Oerlikon Metco公司及Impact Innovations GmbH公司的人員均認為上述數據為2009年冷噴鋁結果的測試值，由於冷噴鋁技術的長足進步，相信冷噴鋁後的結合強度已大大的提高，如果配合適當的熱處理，使噴塗材料擴散融合，將使部分材料得到更接近100%的原始材料強度，大大提昇其應用層面。

2、2、3 冷噴鋁之應用

冷噴鋁在較低的溫度及較高的速度下進行噴鋁，乃是為改善高速火焰高達0.5%空孔率及較低的結合力等問題⁽²⁾，因此一般既有的噴塗應用，皆可以藉助冷噴鋁來進行。由於在較高的速度及較低的溫度下噴鋁，因此具備以下的優點⁽²⁾：

- 1、噴塗效率高。
- 2、氧化物生成率低；塗層緻密性高。
- 3、高導熱及導電性。
- 4、底材入熱量低；高穩定相及組成。

- 5、溫度低晶粒不易成長，可維持材料原有奈米結構。
- 6、噴塗束寬度範圍可控制至小於3mm。
- 7、表面形狀可精確遵循，可後加工處理
- 8、噴塗距離短，可低於10mm。

圖6為冷噴鋅噴塗應用實例照片^(1,4)，圖6(a)、(b)分別為在陶瓷管外噴塗金屬層及在鋁管內噴塗銅合金的應用，圖6(c)為在鋁合金管外噴塗鈦、鈮、鈦、鎳、不鏽鋼及銅等材料，以及在陶瓷管外噴塗銅及鎳的例子，顯示一些高熔點的金屬也可以藉由冷噴鋅堆疊成形，圖6(d)、(e)則為實際在鋁管材外持續堆鋅，得到近似成形的組件，藉由適當的後加工，達到最終的形狀，因此圖6(f)的航空組件也可以藉由冷噴鋅達到近似成形，然後加工予以修復，此一修復方式也可以用於本公司突發案例的應急解決方案。根據國外的新聞報導，GE公司已經運用冷噴鋅在部分氣渦輪機組件的成形。

基於本公司有一些電力元件，需要複合的鍍層，例如在金屬桿上噴塗一圈銅合金負責導電，然後在接觸頻繁的頂端噴塗鎢以耐磨耗及耐高溫，因此研習過程中與Impact Innovations GmbH公司的Peter博士討論到藉由冷噴鋅噴塗兩層材料的問題，Peter博士表示有些運用範圍尚待研究，以Impact Innovations GmbH公司的經驗，有些金屬無法噴塗在特定的材料上，例如許多材料可以噴塗在玻璃上，但銅合金則無法噴塗在玻璃上。如果嘗試以鋁合金噴塗在材料(例如玻璃)上，再噴塗銅合金在鋁合金上，則需要控制氣體/噴塗粉末速度，以免使玻璃上的鋁合金剝離，因此本所人員所詢問的應用例，尚待驗證及測試。

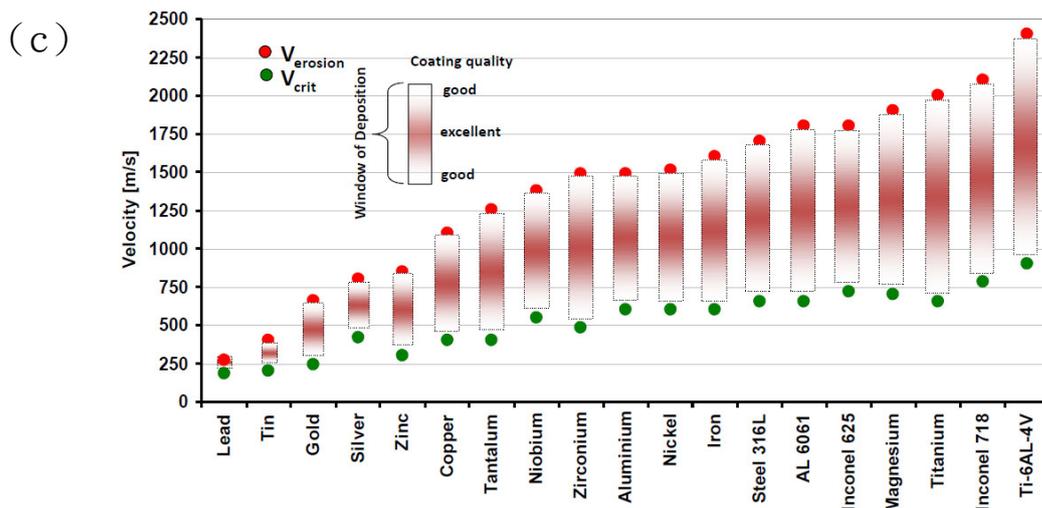
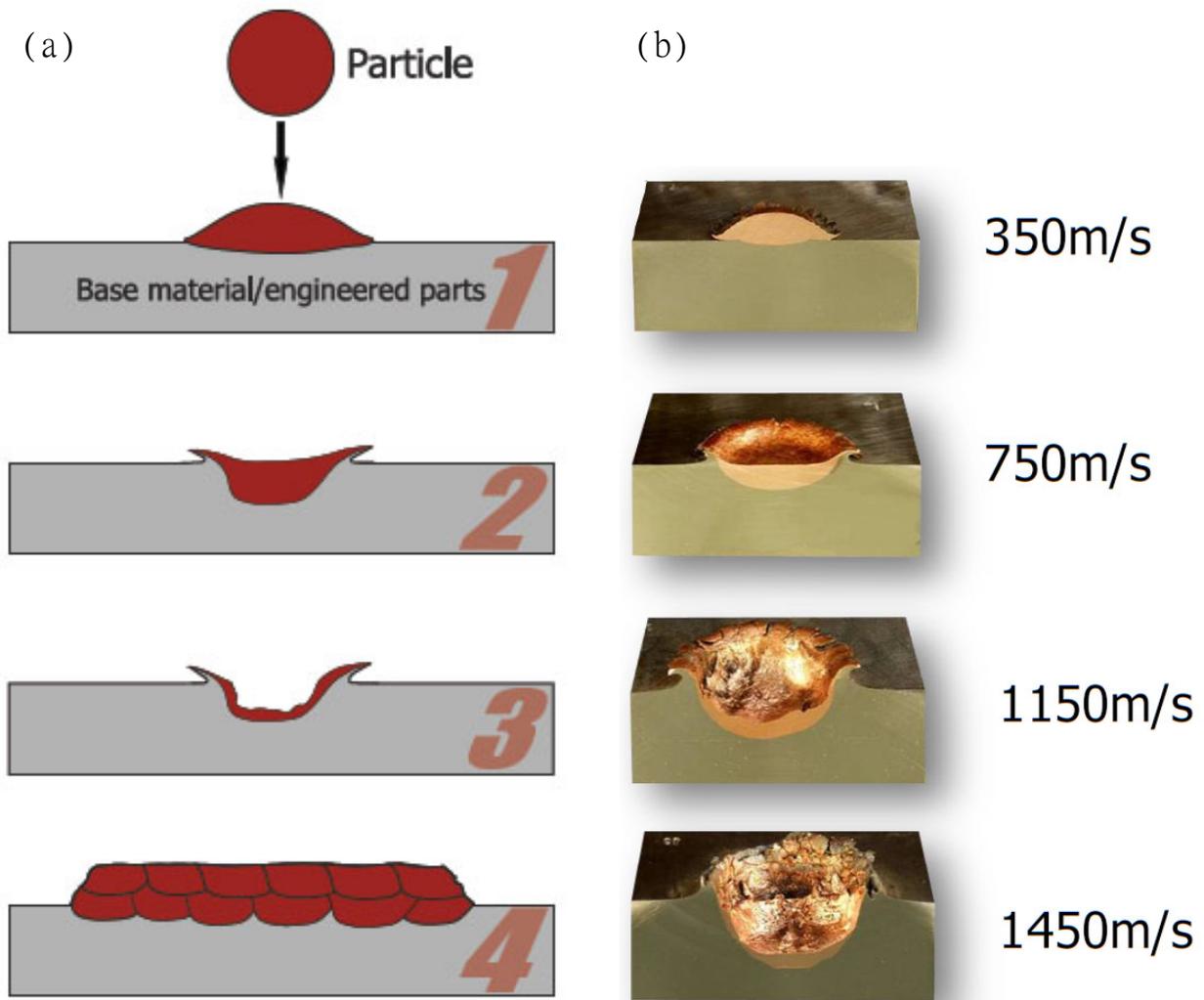
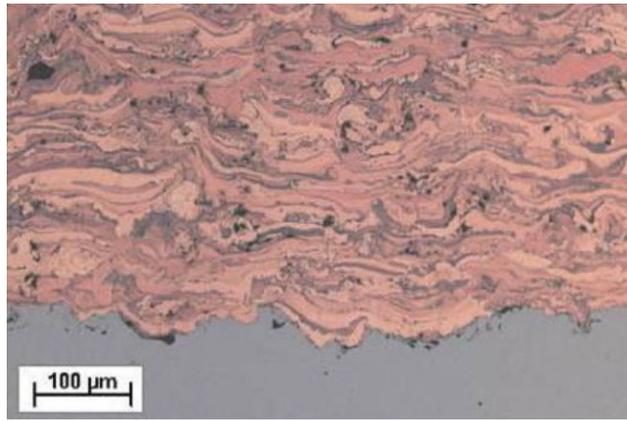
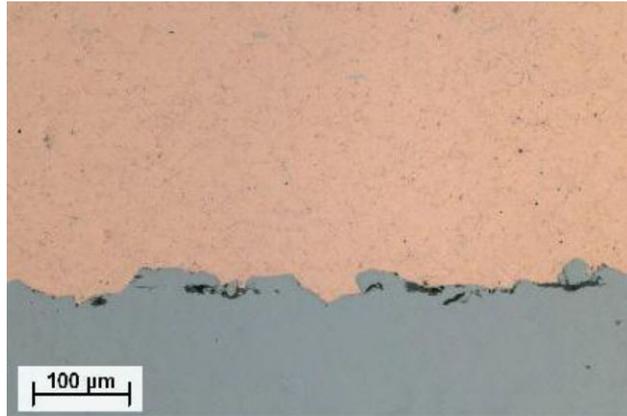


圖 3 冷噴鋁噴塗氣體/顆粒速度對鍵結情形之影響^(1,4) (a) 噴塗材料嵌入程度示意圖 (b) 噴塗材料實際嵌入照片 (c) 不同噴塗材料之最適化氣體速度

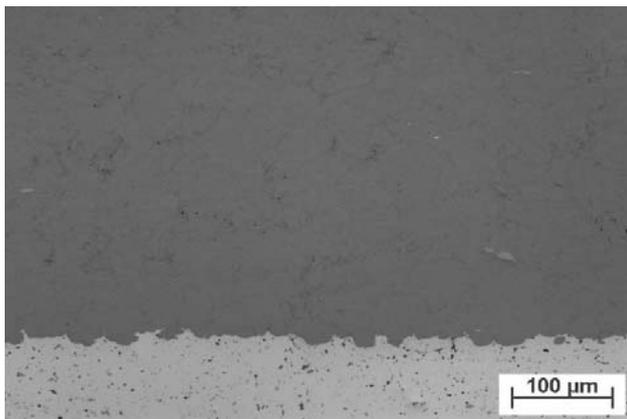
(a)



(b)



(c)



(d)

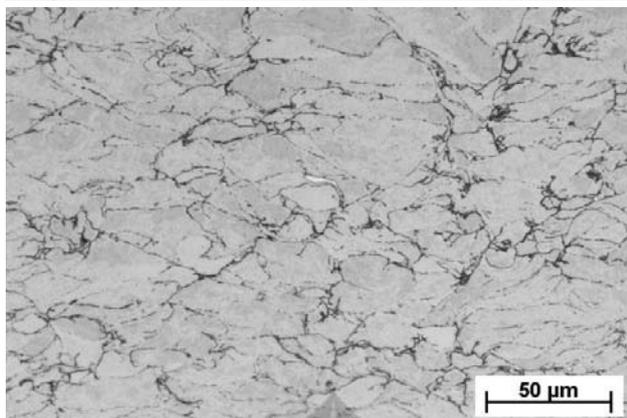


圖 4 冷噴鋅噴塗後之橫切面金相照片^(1,4) (a) 一般製程噴塗銅合金後 (b) 冷噴鋅噴塗銅合金後 (c) 冷噴鋅噴塗鈦合金後 (d) 噴塗鈦合金後腐蝕液浸蝕後

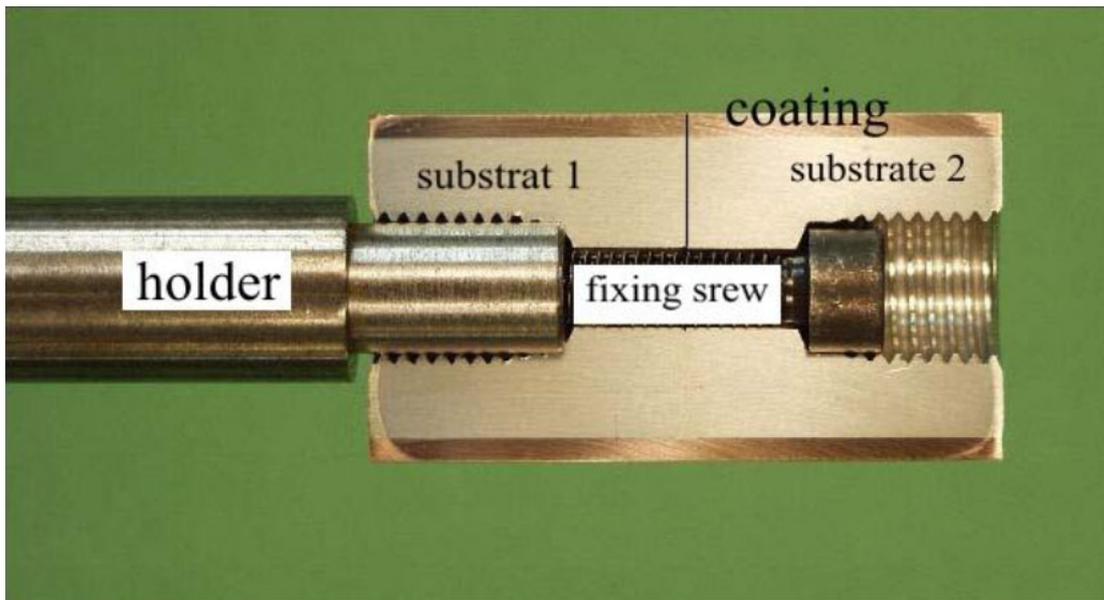


圖 5 冷噴鋅噴塗層結合強度拉伸試驗裝置照片⁽⁵⁾

表 2 冷噴鋅噴塗層結合強度拉伸試驗數據⁽⁵⁾

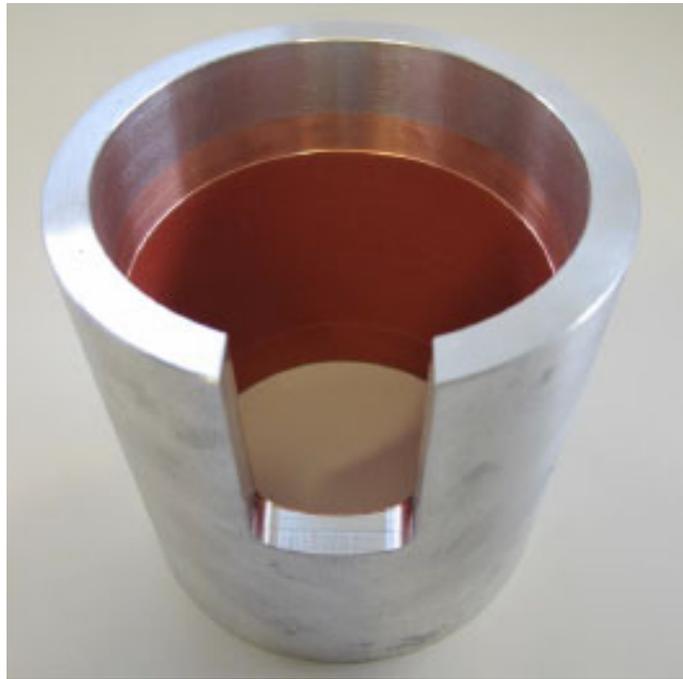
Coating Material	TCT - Test	Tensile Test	Original
Titanium	300 MPa	465 MPa	680 MPa
Steel 316 L	230 MPa	350 MPa	600 MPa
Inconel 625	150 MPa	230 MPa	950 MPa
Aluminum	130 MPa	200 MPa	500 MPa

extract from records status 2009 average values / depending on exact alloy

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



圖 6 冷噴鋅噴塗應用實例照片^(1,4) (a) 管件外部噴塗 (b) 管件內部噴塗 (c) 鋁管外部各種金屬噴塗 (d)、(e) 近似成形及加工 (f) 待修航空用零件

三、掃描建模技術研習

3、1 掃描建模技術介紹

掃描/量測設備可分為接觸式與非接觸式兩大類。有些設備為接觸式，有些為非接觸式，也有一些則是混合兩種方式使用，常見的掃描/量測設備有：三次元量床、手臂型掃描/量測設備、雷射追蹤定位量測設備、光學定位量測設備、手持式雷射掃描設備及光柵式掃描設備。

本所現有三次元量床及光柵式掃描設備，設備及量測情形如圖 7 所示，前者精度最高可達 μm 等級，但受限於床台大小，有工件尺寸的限制。其每次碰觸只能量測單點的座標或沿物件邊緣拖曳得到 2D 輪廓線，故較適合做自動化、高精度要求之重複量測工作，不適合做為複雜物件之逆向掃描工具；後者主要靠中間部位的白光或藍光發射光柵式光源並藉兩側的 CCD 鏡頭得到掃描的圖檔，其需要在工件上貼上圓形定位標籤去重疊不同時間掃描的點雲資料。使用時可以依工件大小及解析度需求，更換不同焦距的 CCD 或調整 CCD 的間距與夾角，得到單一掃描從 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \sim 1300 \times 1300\text{mm}$ 之範圍。基本上掃描範圍越小，解析度越好，掃描死角較小，但量測大型工件時較耗時耗工，再者，如果要量測工件背面或者工件形狀複雜，則需要事先在轉折或轉換的部位黏貼較多的參考點，然後再移動 CCD 鏡頭，藉由掃描及軟體的計算得到合併的圖檔，此法對於具有許多深窄變化組件的幾何量測上較不方便。

3、2 移動式掃描建模技術及實務

移動式掃描建模屬於光學定位量測的一種，使用時包含 1~3 個高解析度 CCD 鏡頭及一組無線探測手把^(6~9)，該手把前端為紅寶石探球，尾部有數個不同的編碼標籤，在探球接觸工件按下量測鈕的同時，CCD 鏡頭會抓取手把尾部的定位標籤位置，並計算出紅寶石探球的球心座標。

Solutionix 公司所建置的移動式掃描建模系統使用 3 個高解析度 CCD 鏡頭及一組無線探測手把，如圖 7 所示。圖 7(a)為定位用 CCD 鏡頭，圖 7(b)、(c)為無線探測手把，手把上有 5 個定位標籤，為了配合量測的需求，手把上有兩個定位標籤可以依使用者的需要，於量測前設定相對旋轉 0° 、 45° 或 90° ，圖 7(d)為大型複雜工件量測情形，基本上 3 個 CCD 鏡頭只要有 1 個可以測得定位標籤或者定位標籤沒有全部受遮蔽，就可以測得量測點的相對位置。如果待測工件太大或其背面受遮蔽嚴重，則可以事先在轉折或轉換的部位黏貼較多的定位點，然後再移動 CCD 鏡頭，藉由軟體的計算得到合併的圖檔。Solutionix 公司所建置的移動式掃描建模系統配合強大的軟體計算能力，可以得到 1 米以內尺寸誤差只有 $10\ \mu\text{m}$ ，5 米以內尺寸誤差只有 $50\ \mu\text{m}$ ，屬於目前市場上精度最佳的移動式掃描建模系統。



圖 7 綜合研究所現有量測及建模設備量測情形 (a) 三次元量測 (b) 光柵式掃描設備拍攝

(a)



(b)



(c)



(d)



圖8 移動式光柵式掃描量測情形^(6~9) (a) 定位用CCD鏡頭 (b)、(c) 接觸式測頭 (d) 量測情形

四、葉片內孔鍍層技術研習

本公司近年陸陸續續建立了超過 50 部之氣渦輪機組，這些機組的製造廠為了提高效率，將燃氣溫度自 1200°C 提高到 1400°C 甚至更高，為了確保葉片材料在該溫度安全運轉，原廠將其材質自傳統的鎳基超合金鑄造材料提升到方向性凝固合金 (Directional Solidification Alloy) 甚至目前的單晶材料 (Single Crystal)⁽¹⁰⁾；另一方面葉片製造廠也在葉片表面噴塗陶瓷絕熱層，同時，新形式的葉片設計了更多的冷卻流道，例如三菱公司 501G 第一級動葉片的冷卻孔將近 200 個。在這些保護方案之外，葉片內部的冷卻流道也以化學氣相沉積(CVD)的方法鍍鋁，使其在運轉過程自然形成鋁的氧化層，以提供葉片內孔材料一定程度的保護。本所尚未建立化學氣相沉積鍍鋁的設備及製程，參訪 IHI Ionbon 公司，希望對該技術有更深入的了解，以便將來有能力引進適當的設備或自行組裝設置。

4、1 葉片內部缺陷介紹

圖 9 為西門子公司 V84.2 及 SW 501F 第一級動葉片與冷卻流道照片⁽¹¹⁾，圖 9 (a) 顯示 V84.2 第一級動葉片壓力側及頂部照片與其冷卻流道照片，由圖 9 (a) 可知：約 400°C 的冷卻空氣由葉片根部進入，一股較少量的氣體由頂端流出，另一股較大量的氣體進入複雜曲折的流道最後由葉片尾部(Trailing Edge)流出。圖 9 (a) 中三個紅色的箭頭所指為常見的內部裂紋或材料薄化發生的區域，當發生明顯裂縫或

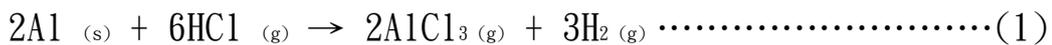
一定程度的薄化時，這些葉片便不能再生使用了，圖 9 (b) 為 SW 501F 第一級動葉片與冷卻流道照片⁽¹¹⁾，SW 501F 葉片基本上可以和本公司正在運轉的三菱 M501F 葉片通用，從圖 9 (b) 中更為複雜的冷卻流道來看，隨著 M501F 葉片更長時間的使用，勢必也會發生內部裂紋或材料薄化，使葉片不能再生使用。

圖 10 即為 V84.2 第一級動葉片 X 光檢測照片發現裂縫的例子，圖中箭頭所指亮白的線性指示即為裂縫或葉面薄化的區域，該線性指示對 X 光阻擋較少因此顯示較亮白，圖 10 (a) 對應於圖 9 (a) 冷卻流道照片中左上箭頭所指葉片導翼側頂部附近，顯示該處有局部葉面材料薄化的現象；圖 10 (b) 對應於圖 9 (a) 冷卻流道照片中上方箭頭所指葉面肋骨頂部附近，顯示該處有局部葉面材料薄化的現象；圖 10 (c) 對應於圖 9 (a) 冷卻流道照片中上方箭頭所指葉面肋骨的中間段，圖中顯示肋骨構造兩側之八字形裂縫，左側段長度約 9.6mm，右側段長度約 6.5mm。

綜合研究所致力於葉片自行再生能力的建立已 20 餘年，期間將西門子公司認為不可再用的 V84.2 葉片作第二次再生，成功朝 75000 運轉小時使用；目前公司燃氣溫度較高的三菱 M501F 機組，綜合研究所也致力研發第三次再生，朝 64000 運轉小時努力，如果葉片內部冷卻孔可以藉由化學氣相沉積技術鍍氧化鋁(Aluminite)鍍膜而得到保護，則葉片壽命必然得到延長。事實上有些原廠的新型葉片也已執行 Aluminite 鍍膜的程序。

4、2 化學氣相沉積鍍鋁原理

化學氣相沉積在工件表面鍍鋁的技術發展，有許多年的歷史，早期的類似方法有漿料鍍鋁(Aluminum Slurry Coating)、包覆滲透鍍(Pack cementation coating)、化學氣相沉積(Cheical Vapor Deposition)，這些方法有其限制或缺點，例如漿料鍍鋁法無法達到工件較微細的孔內，包覆滲透鍍鋁法使用鹵素較不安全，傳統化學氣相沉積法使用 NH_4Cl 亦屬較不安全的製程；IHI IONBOND AG 公司使用 HCl 氣體相對於使用 NH_4Cl 氣體較安全⁽¹²⁾。以化學氣相沉積方法鍍鋁的基本反應式如公式(1)~(4)^(12,13)：



基本上分別在 300 或 800°C 以上，鋁與氯化氫氣體反應成三氯化鋁、二氯化鋁或氯化鋁等不同活性度的氯化鋁氣體，然後氯化鋁氣體在高溫和鎳基材料反應得到鎳鋁層，不同型態的鎳鋁層以富鋁的 β -NiAl 較佳^(14,15)，如果形成富鎳的 Ni_3Al 則較不具保護性，表面的鋁氧化成為氧化鋁之後，對母材能夠提供一定的保護能力^(14,15)。

4、3 化學氣相沉積鍍鋁實務

圖 11 為化學氣相沉積(CVD)設備照片及簡易流程圖，圖 11 (a) 的

設備照片顯示 CVD 設備有三層鎗體，中間為加熱鎗體，其內以層架置放工件，圖中左側為真空鎗體，負責一定程度真空的達成及保持氣密，圖中右側為外鎗；圖 11 (b) 為簡易流程圖，圖中右上方代表圖 11 (a) 的三層鎗體，圖中左側的預先反應槽將導入的氯化氫氣體與鋁預先反應成低活性度的三氯化鋁，此時氫氣提供還原能力使金屬鋁具較佳的活性，惰性氣體氬氣則可以調節及控制反應速率，圖中右下方的氫氣及氬氣作為承載氣體，將低活性度的三氯化鋁導入主鎗體並且反應成高活性度的氯化鋁氣體，高活性度的氯化鋁與工件反應形成富鋁的金屬間化合物⁽¹²⁾。

圖 12 為 IHI IONBOND AG 公司化學氣相沉積鍍鋁葉片照片，圖中尾翼冷卻孔出口直徑僅 0.5mm，透過其化學氣相沉積鍍層處理仍能有均勻良好的鍍鋁效果⁽¹²⁾。圖 13 為常態的化學氣相沉積鍍鋁後金相照片，圖 13 (a) 為較下層外表面鍍鋁後金相照片，顯示鍍鋁層有 22 μm ，圖 13 (b) 為較上層且內表面鍍鋁後金相照片，顯示鍍鋁層仍有 20 μm ⁽¹²⁾。可見其鍍鋁層厚度頗為均勻。圖 14 為化學氣相沉積鍍鋁及熱處理前後金相照片，圖 14 (a) 為熱處理前金相照片，顯示鍍鋁後表層有 35.1% 的鋁含量，另外有一層擴散層有 33.8% 的鋁含量，當熱處理後，表層鍍鋁層及擴散層的鋁往內擴散，雖然此兩層及底材的鋁含量略有下降，但也形成更大厚度的富鋁層來保護底材，如圖 14 (b) 所示⁽¹²⁾。

由於本所執行葉片再生時，內孔表面勢必因 400°C 的冷卻空氣而氧化，所以必須以氫氟酸清洗去除氧化層以便活化內表面，再進行化學氣相沉積鍍鋁，由於鍍鋁後得到的是一層鍍鋁金屬層，因此不致影響後續執行真空電漿噴鋅超合金界層，所以程序上可以在真空電漿噴鋅

(a)



(b)

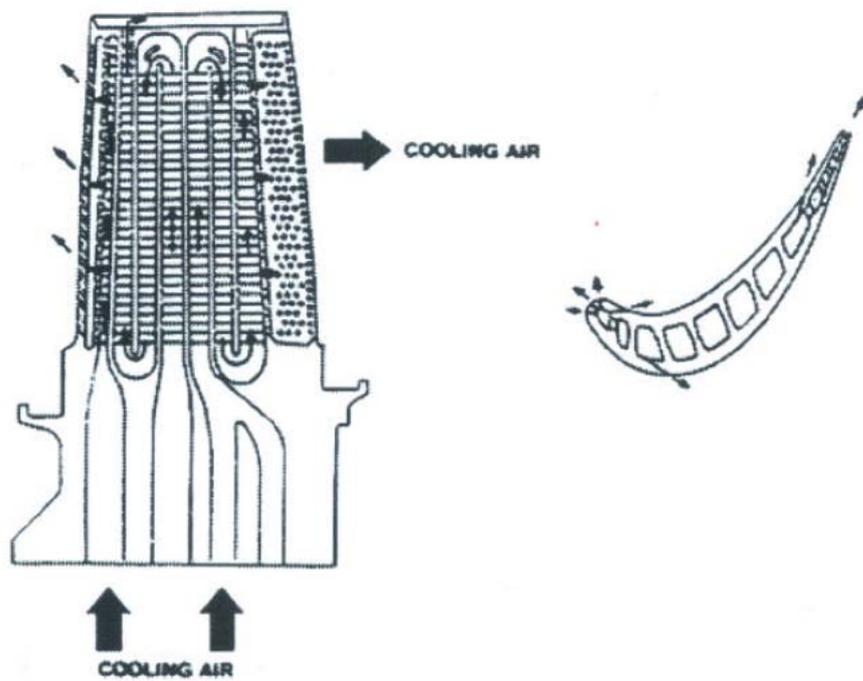
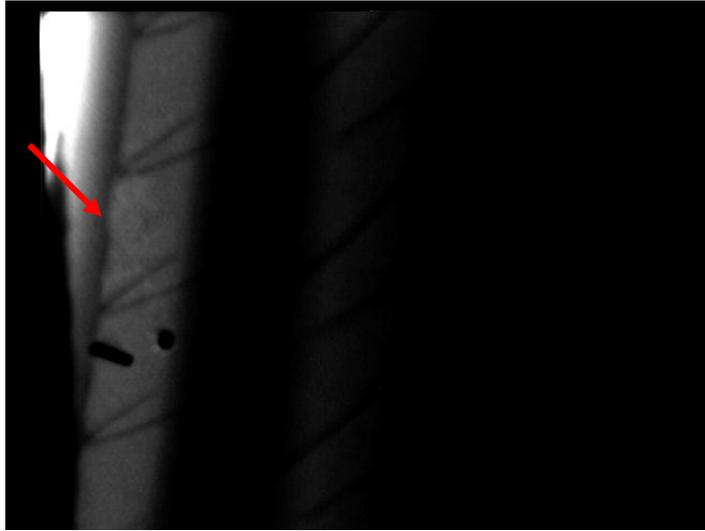
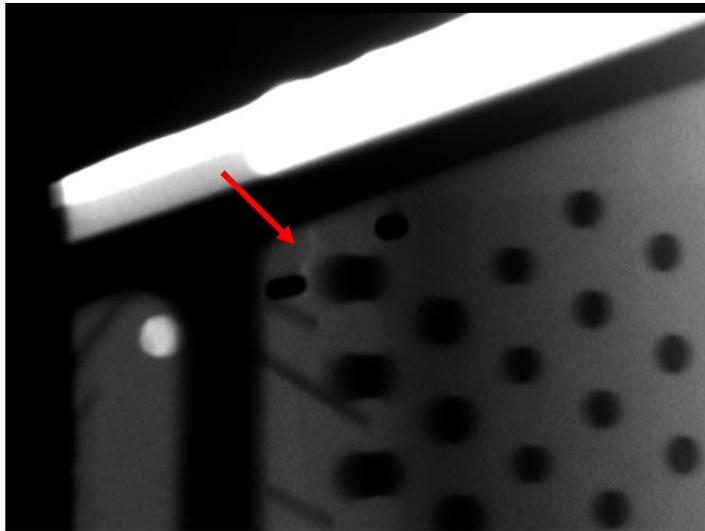


圖9 西門子公司動葉片冷卻流道⁽¹¹⁾ (a) V84.2第一級動葉 (b) SW 501F
第1級動葉

(a)



(b)



(c)

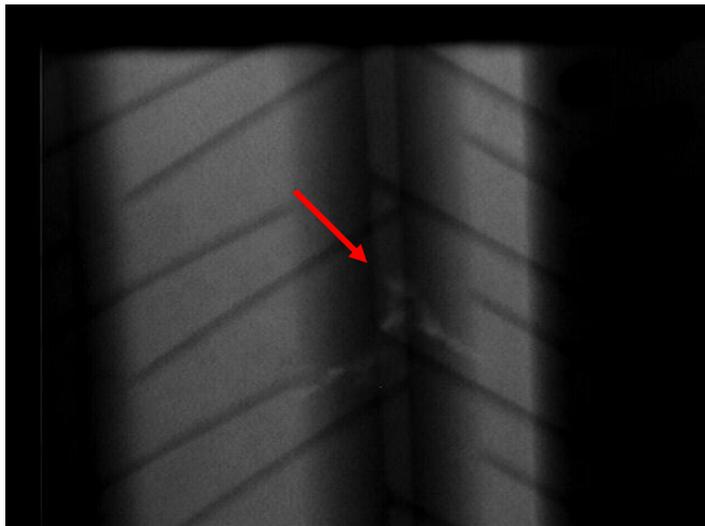


圖10 西門子V84.2第一級動葉片內部冷卻流道損傷RT照片 (a) 葉片導翼側頂部附近 (b) 葉面肋骨頂部附近 (c) 葉面肋骨中間段

(a)



(b)

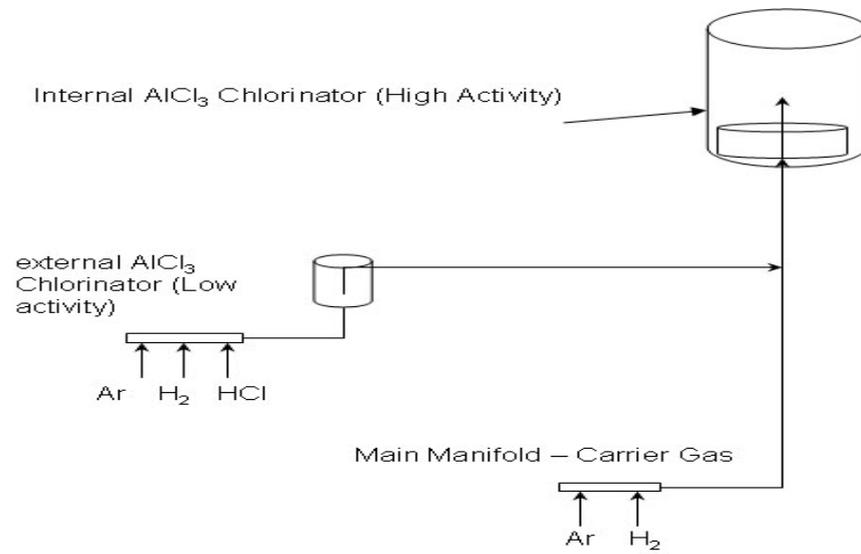
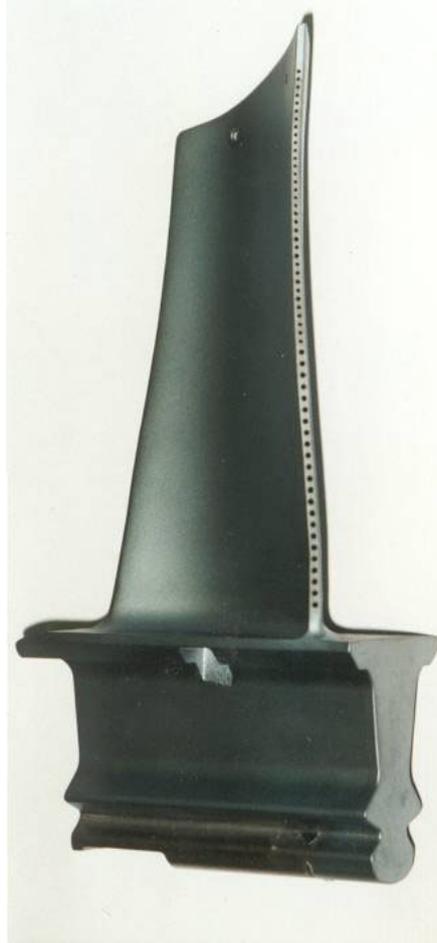


圖 11 化學氣相沉積設備照片及簡易流程圖⁽¹²⁾ (a) 設備照片 (b) 簡易流程

(a)



(b)

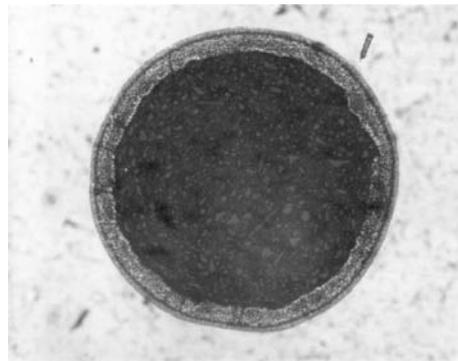
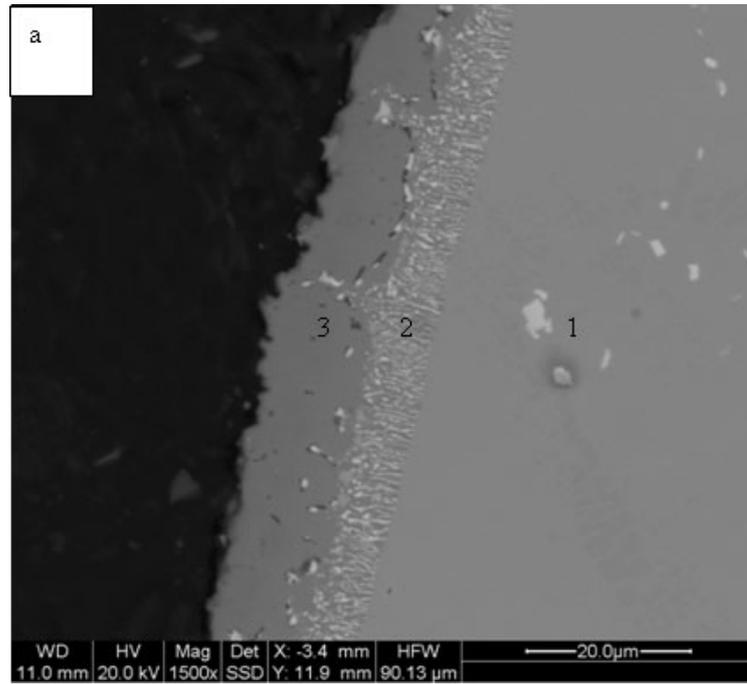


圖12 化學氣相沉積鍍鋁葉片照片⁽¹²⁾ (a) 動葉片照片 (b) 孔內壁CVD
鍍層金相照片

(a)



(b)

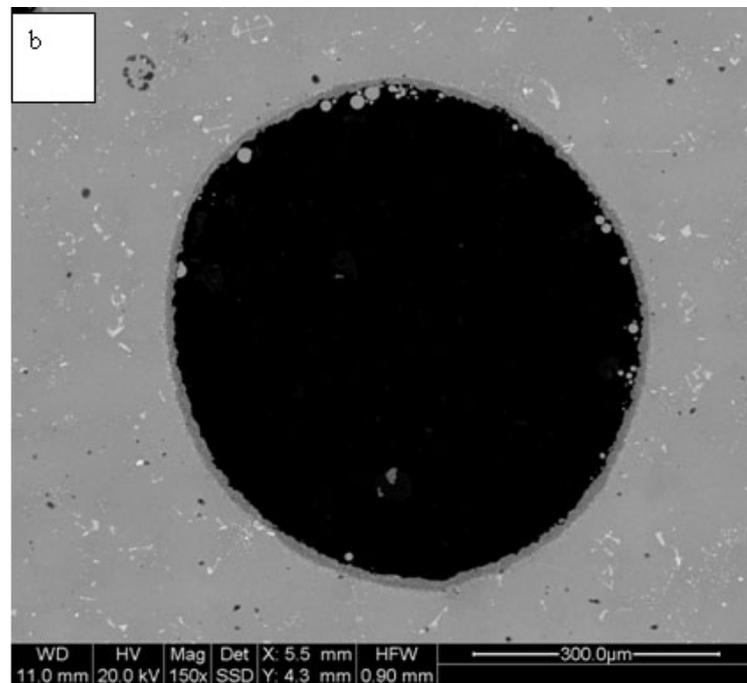


圖 13 化學氣相沉積鍍鋁後金相照片⁽¹²⁾ (a) 較為下層或外表面鍍鋁後
(b) 較為上層且內表面鍍鋁後

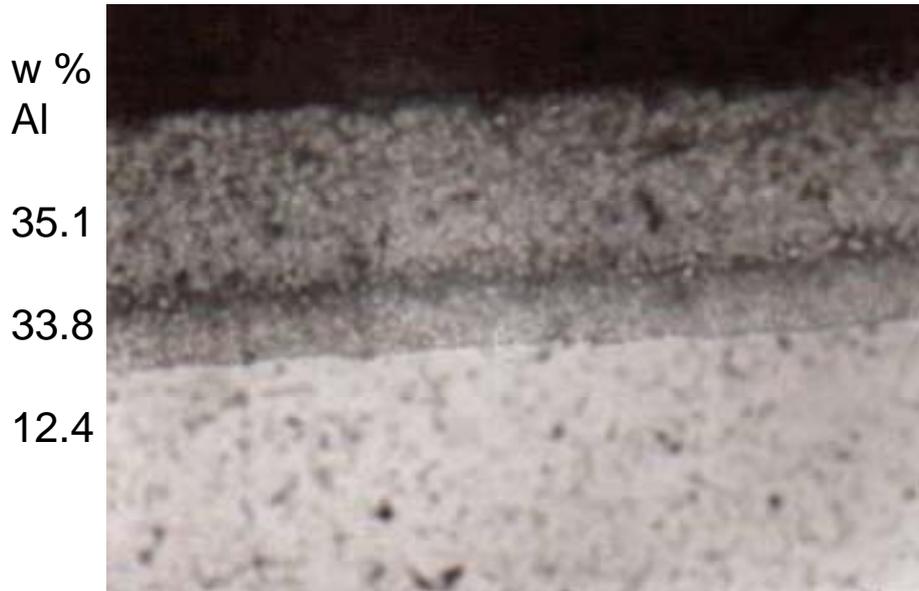


圖 14 化學氣相沉積鍍鋁及熱處理前後金相照片⁽¹²⁾ (a) 熱處理前 (b) 熱處理後

之前執行，執行化學氣相沉積鍍鋁時，葉根必須包覆以保護之；至於葉面則可以選擇包覆也可以選擇不包覆。

IHI IONBOND AG 公司的化學氣相沉積鍍鋁製程，僅使用 HCl 氣體、氫氣及鋁，相對較安全，但仍須防止鋁金屬如果是粉末時的易燃問題，以及 HCl 氣體的毒性與氫氣火災危險。其所產生的副產物主要是 NaCl 與溶於水的 $AlCl_3$ ，屬於不危險且容易處理的廢棄物。

根據文獻的報導^(14,15)，選擇單晶材料 Rene 80，一種鎳-鉻-鈷-鈦-錳-鎢-鋁合金，成分近似 Inconel 738 但鈦-錳-鎢-鋁含量略高^(14,15)，在其表面以漿料鍍鋁法鍍鋁及化學氣相沉積法鍍鋁，然後在 $1100^{\circ}C$ 下進行循環氧化試驗，結果化學氣相沉積鍍鋁可承受的循環氧化試驗數是漿料鍍鋁法的 3.5 倍，相比於 Rene 80 材料，化學氣相沉積鍍鋁可承受的循環氧化試驗次數遠遠高出 Rene 80 材料許多。詳如圖 15 所示。

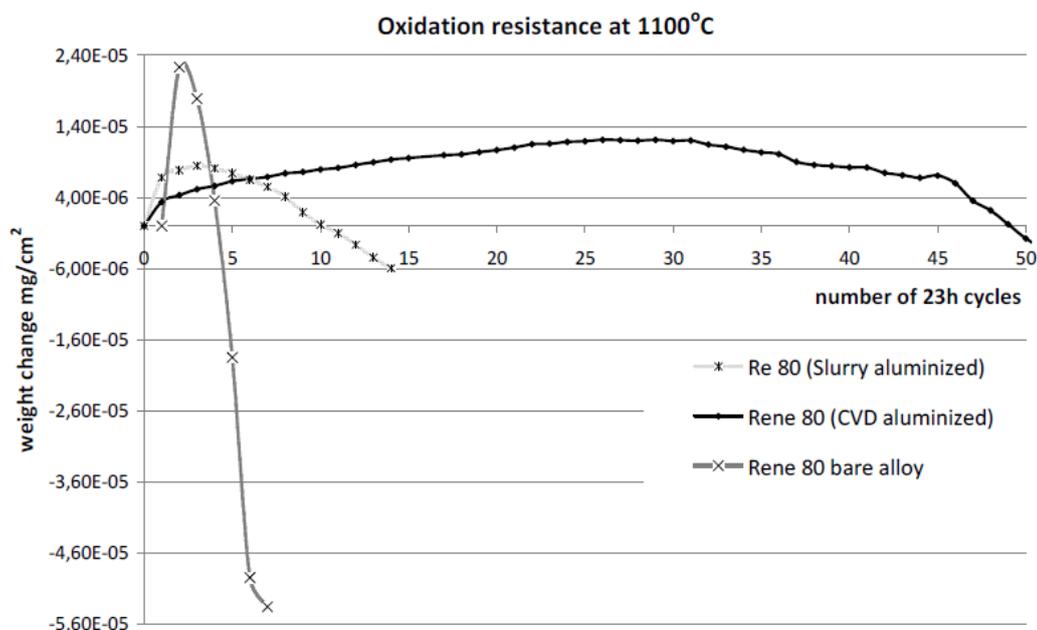


圖 15 Rene 80 材料不同鍍鋁法在 $1100^{\circ}C$ 之循環氧化試驗結果^(14,15)。

五、其他相關技術研習

參訪 Oerlikon Metco 公司過程，Oerlikon Metco 公司亦安排介紹該公司在電漿噴塗輔助物理蒸鍍法(Plasma Spray - PVD)及雷射覆鍍(Laser Cladding)等方面的技術現況，因為此兩項技術亦關聯於氣渦輪機組熱段組件的再生，因此將參訪時所得到的初步了解敘述於下：

電漿噴塗輔助物理蒸鍍法是以電漿輔助蒸鍍材料的氣化及蒸鍍於工件上，設備外觀如同一部真空電漿噴鍍設備，蒸鍍是在 1 mBar 的真空鍍以下進行，氣化的噴塗材料受電漿及電場的導引蒸鍍在工件上，因此不怕兩支葉片(例如氣機第二級靜葉兩支一組)間的遮蔽效應，蒸鍍厚度可達 50~500 μm ，鍍層組織為柱狀晶的形態，與電子束輔助物理蒸鍍法所能得到的優異陶瓷絕熱塗層是一樣的⁽¹⁶⁾。圖 16 為電漿噴塗輔助物理蒸鍍法原理及成品照片，由圖中可見蒸鍍未明顯受葉片間遮蔽效應的影響，圖 16(b)中的例子，不受葉片間遮蔽的區域鍍層有接近 200 μm ，而受葉片間遮蔽的區域鍍層也有 120 μm 以上⁽¹⁶⁾。

雷射覆鍍由於局部的入熱量集中且整體的入熱量相對較低，因此較不易產生鍍接過程的熱裂，所以已被廣泛用於鎳基超合金的鍍補，由於其可以堆鍍成形，相同的原理也被用在雷射粉末燒結快速製造⁽¹⁷⁾，為 3D 列印成形的重要方法之一。圖 17 為 Oerlikon Metco 公司雷射覆鍍實例^(18,19)，圖 17 (a) 為雷射堆鍍成形的捏合機齒(Kneader teeth)，圖 17 (b) 為雷射堆鍍將齒輪包覆成形的葉輪，圖 17 (c) 為常見的葉片尾端鍍補，圖 17(d) 則為單方向結晶材料以 Inconel 625 雷射鍍補單晶材料 Rene 80 的例子。關於雷射鍍補及堆鍍，本所已有許多技術經驗；至於雷射鍍補單晶材料則為將來需要開發的技術。

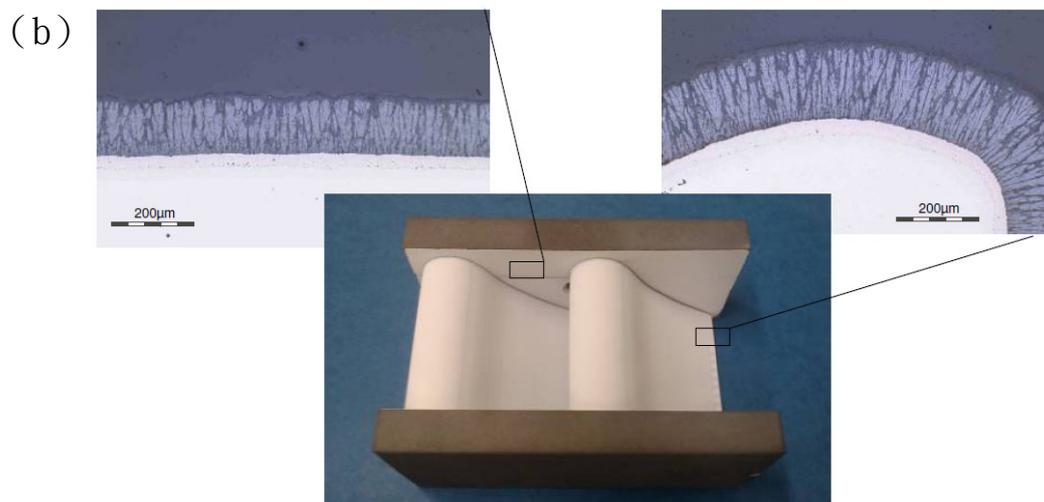
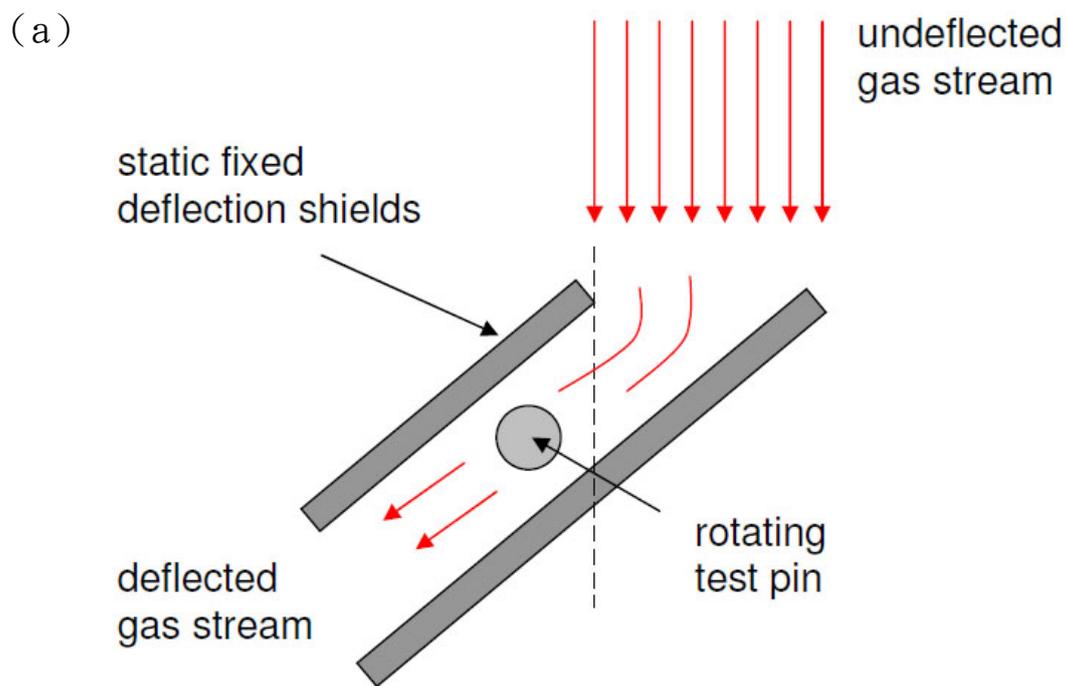


圖 16 電漿噴塗輔助物理蒸鍍法原理及成品照片⁽¹⁶⁾ (a) 蒸鍍情形示意圖 (b) 二級靜葉片蒸鍍後成品

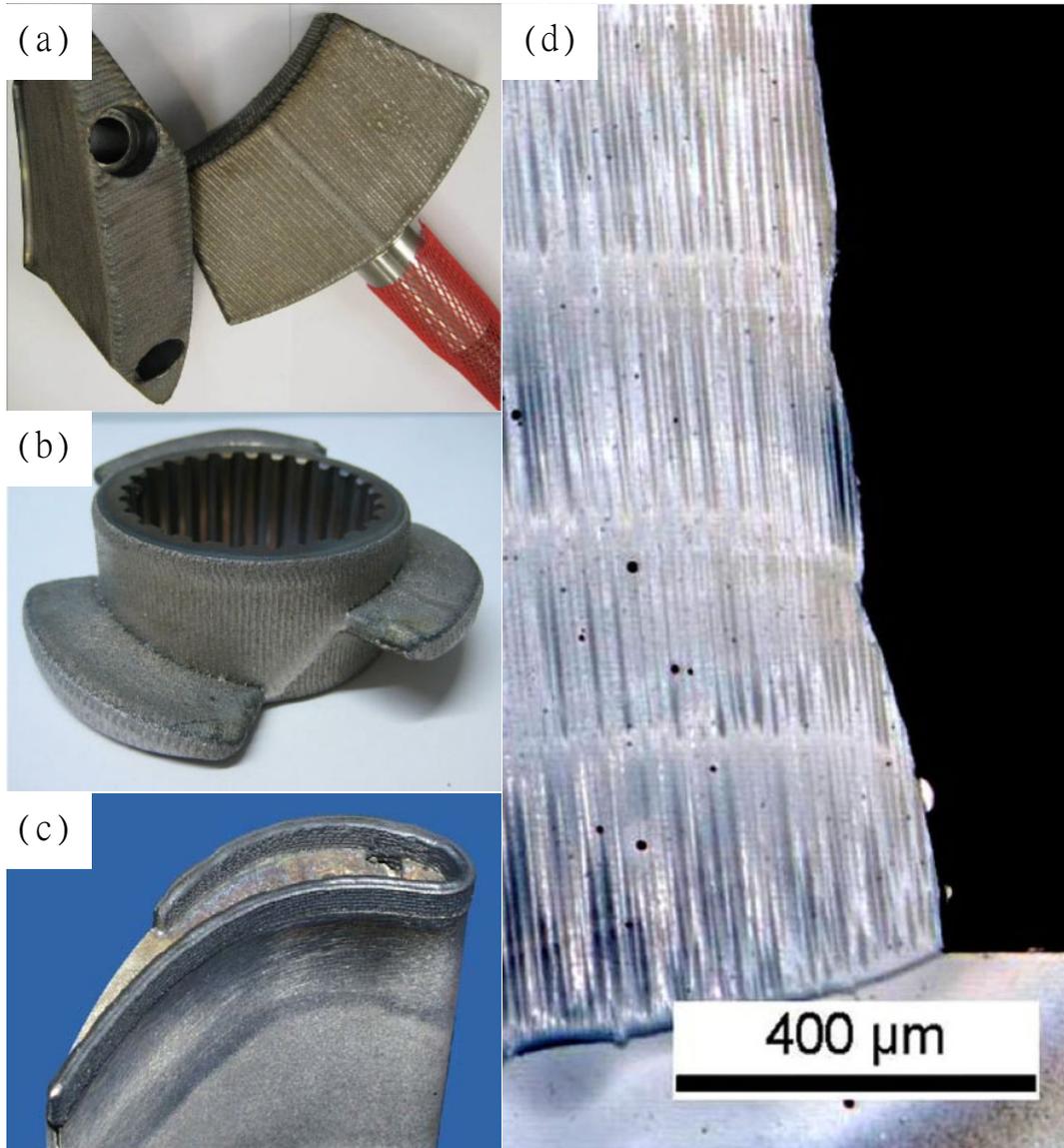


圖17 Oerlikon Metco公司雷射覆鋁實例^(18,19) (a)、(b) 雷射覆鋁的近似成形 (c) 葉片尾端鋁補 (d) 單晶材料雷射鋁補

六、心得及建議

- 1、冷噴鋅因其在低溫高速下噴塗，因此幾無孔隙及氧化現象，噴塗層近乎同質，除了可以取代現有的大氣中的噴鋅以外，由於鍵結強度高，尚可以作近似成形的堆疊，將來配合適當的工法，例如砂心或其他嵌在內的工件等，運用噴鋅可以成形並加工成許多種需要的組件，也可以應用該技術製作電力上所需的異質多層材料的組件。
- 2、本所已有光柵式掃描設備執行量測與建模，來因應公司內組件修護、再生或自製的需求，唯近年電廠汽輪機組低壓轉子末兩級葉片鳩尾槽有一些龜裂的案例，需要對此兩級以及相關的靜葉環量測與建模，以提供力學分析及鋅補技術開發之用，現有的量測設備對於執行此大型複雜的組件有相當的困難，移動式掃描建模技術正好可以應付這些需求，所參訪公司的系統之精度，為目前市面上較高者，使用上也較方便，屬可以考慮引進的系統之一。
- 3、內孔鍍鋁以保護冷卻流道，為葉片再生完整製程中尚待建立的技術之一，本所現有的氟化清洗設備可以作為化學氣相沉積鍍鋁製程的前處理之用。IHI IONBOND AG 公司的技術經驗優異且製程相對安全，本所在預算有限的情形下，需要考慮藉助其技術與經驗，朝先期研究開發與將來自行建立去努力。
- 4、Oerlikon Metco 公司為跨國的大型集團，除了冷噴鋅及電漿噴塗設備與技術為本公司所採用之外，尚有電漿噴塗輔助物理蒸鍍及雷射鋅補單晶材料的技術與經驗可供借鏡。

七、參考資料

- 1、Jochen Tewes, Erik Bähr, “Cold Spray”, Oerlikon Metco公司資料，December, 2014。
- 2、Peter Richter Jr., “Cold Spray-冷氣體動力噴塗”，Impact Innovations GmbH公司代理商提供資料，December, 2014。
- 3、“Cold Spray”，Impact Innovations GmbH公司資料，December, 2014。
- 4、Peter Richter Jr., Peter Richter Sr., Helmut Höll, “New cold spray equipments and components at Impact Innovations”，Impact Innovations GmbH公司資料，May, 2013。
- 5、Peter Richter Jr., “Tensile strenght analysis and microstructures of Cold Gas - Coatings”，Impact Innovations GmbH公司資料，May, 2013。
- 6、“超大物體遠端檢測系統”，Solutionix公司簡報資料，2014。
- 7、“MoveInspect Probing-INSPECTION & ANALYSIS” AICON公司資料，2014。
- 8、“MoveInspect Probing-Portable CMM and hand-held probe MI.Probe” AICON公司資料，2014。
- 9、“MoveInspect Technology for Free Motion Head tests” AICON公司資料，2014。

- 10、Shozo Kaneko, Osamu Wakazono, Takuji Fujikawa, “Large Capacity Power Generation at Highest Efficiency” , World Energy Council 18th Congress, Buenos Aires. October 2001.
- 11、D. Gandy, Combustion Turbine Guidelines: Conventional and Advanced Machines, Volume 9: Siemens V84.2, 1010476, EPRI Final Report, November 2005 p5.1~5.5
- 12、Hristo Strakov, “The Surface Engineers–PVD CVD PACVD Coating Technology” , IHI IONBON公司 CVA Aluminizing簡報資料, November 2014,
- 13、M. Pytel, M. Góral, A. Nowotnik, J. Sieniawski, M. Drajewicz, W. Ziaja, “Heat treatment and CVD aluminizing of Ni–base René 80 superalloy” , Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, V01:51, Issue 1, March 2012, P30–38.
- 14、Marek Goral, Maciej Pytel, Kamil Dychton, Andrzej Nowotnik, “Kinetics Growth and Oxidation Resistance of Aluminide Coatings Deposited by the CVD Method on Re 80 Superalloy” , Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, V01:11, 2012, P853–857.
- 15、M. Pytel, M. Góral*, M. Maliniak, “The influence of production method on oxidation resistance of the aluminide coatings obtained on IN 100 alloy” , International Scientific

- Journal, V01:53, Issue 2, February 2012, P102-108.
- 16、Dr. H.-M. Hoehle, “New LPPS™- Technologies - a short Introduction” Oerlikon Metco公司簡報資料, August 2010
- 17、“雷射粉末燒結快速成型系統”, 德芮達科技股份有限公司網頁資料.
- 18、Dr.-Ing. Thomas Peters, “Laser Cladding for IGT component repairs”, ASME Turbo Expo Düsseldorf, June 19th 2014.
- 19、“Advanced Robotic Laser CladdingThe Oerlikon MetcoClad System”, Oerlikon Metco公司簡報資料, October 2014.